

# 修士論文

## ネットワーク仮想化技術を利用した QoS 予測・予約による V2X 通信の信頼性向上

Improvement of V2X Communication Reliability  
by QoS prediction & Reservation  
Using the Technology of Network Virtualization

同志社大学大学院 理工学研究科 情報工学専攻

2022 年度 0136 番

国本 典晟 / Tensei Kunimoto

指導教員

理工学研究科 情報工学専攻  
ネットワーク情報システム研究室

佐藤 健哉 教授

2024 年 1 月 24 日

# Abstract

Due to the limited sensing range of sensors installed in vehicles, research on cooperative automated driving aiming to enhance traffic safety and efficiency is being conducted by sharing information recognized by sensors on surrounding vehicles and roadside units through communication. Aggregating sensor data collected by individual vehicles and roadside units on a server, and delivering integrated information to vehicles, allows them to acquire information beyond what can be recognized by their onboard sensors. However, there is a concern that if the number of vehicles concentrated within the area managed by the server exceeds the capacity accommodated by the communication bandwidth to the server, the communication bandwidth may become congested, and it may not be possible to guarantee the quality of service (QoS) of communication. In this study, we propose the use of network virtualization technology to centrally manage the network through software, anticipating the concentration of vehicles in advance and predicting QoS. Additionally, we propose reserving future QoS for vehicles to ensure their QoS. We evaluate the proposed method through network simulation to assess its effectiveness.

## Keywords

1. Cooperative automated driving, 2. QoS, 3. Network Virtualization

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
第3章	提案手法	4
3.1	ネットワーク仮想化技術を利用したネットワーク	4
3.1.1	協調型自動運転のためのネットワーク	4
3.1.2	ネットワーク仮想化技術による通信制御	4
3.2	QoS 予測	5
3.2.1	コントローラが管理する情報	5
3.2.2	QoS の予測方法	5
3.3	QoS 予約	6
3.3.1	QoS の予約方法	6
3.3.2	QoS の予約時間	7
第4章	評価	8
4.1	評価環境	8
4.2	通信性能	9
4.3	動的な優先度分類	9
4.4	通信のリアルタイム性	10
第5章	考察	11
第6章	おわりに	13
	謝辞	14
	参考文献	15
	研究業績	16

# 第1章 はじめに

## 1.1 背景

安全で効率的なモビリティ社会の実現を目指して、車両が自動で運転操作を行う自動運転に関する研究が積極的に行われている [1]。特に、車両に搭載されたセンサの高度化によって、周囲の走行環境を詳しく認識できるようになり、事前に周囲の車両や歩行者、障害物を検知して、自動で減速・停止等を行い危険を回避する取り組みが進められている。しかし、自車両に搭載されたセンサのみでは、建物の陰にいる歩行者を認識できないなど、認識できる範囲は限定的である。そのため、建物の陰から急に飛び出した歩行者や、見通しの悪い交差点における出会い頭の事故などには対応が困難であるという問題がある。こうした状況に対応するため、車両と、車両や路側機などの様々なものの無線通信である V2X (Vehicle to Everything) 通信を利用して、安全性の向上を目指す協調型自動運転の研究が行われている [2, 3]。協調型自動運転では、図 1 に示すように、車両や路側機は自身が搭載するセンサで収集したセンサ情報や走行情報などをサーバに送信する。そして、サーバは送信された情報を統合し、統合した情報を再度車両に送信する。この情報には他の車両や路側機に搭載されたセンサで収集された情報が含まれているため、車両は自車両に搭載されたセンサだけでは認識できない周囲の走行環境を認識することができるようになり、見通しの悪い環境における事故を回避することができる。

情報を統合するサーバは、処理負荷の分散や通信遅延の軽減のために地理的に分散されており [4]、サーバにはそのサーバが管轄するエリア内の全ての車両や路側機から定期的に情報が集約される。しかし、サーバまでの通信帯域は限られている場合が多く、車両が集中した場合に使用可能な通信帯域以上に通信帯域を必要としてしまい、通信帯域が逼迫することが懸念される [5]。協調型自動運転では、事故の回避等のために情報が必要となるため、低遅延での情報の送受信が求められるが、通信帯域が逼迫すると情報の送受信の遅延が増大するため、許容される遅延時間内に情報を受け取ることができず、通信の品質 (Quality of Service, 以下 QoS) が保証されない。また、車両は事前に通信の QoS が保証されるか否かを把握することができないままに協調型自動運転を試みることになるため、安全性や効率の点で重大な問題となる。

## 1.2 目的

本研究では、車両が集中した場合に通信の QoS が保証されず、そのことを車両が事前に判断することができない問題を解決するため、ネットワーク仮想化技術を利用して通信の QoS を予測し、車両の将来の通信の QoS を予約することを提案する。ネットワークシミュレーションを用いて通信モデルを構築し実験を行い、提案手法の有効性を評価する。

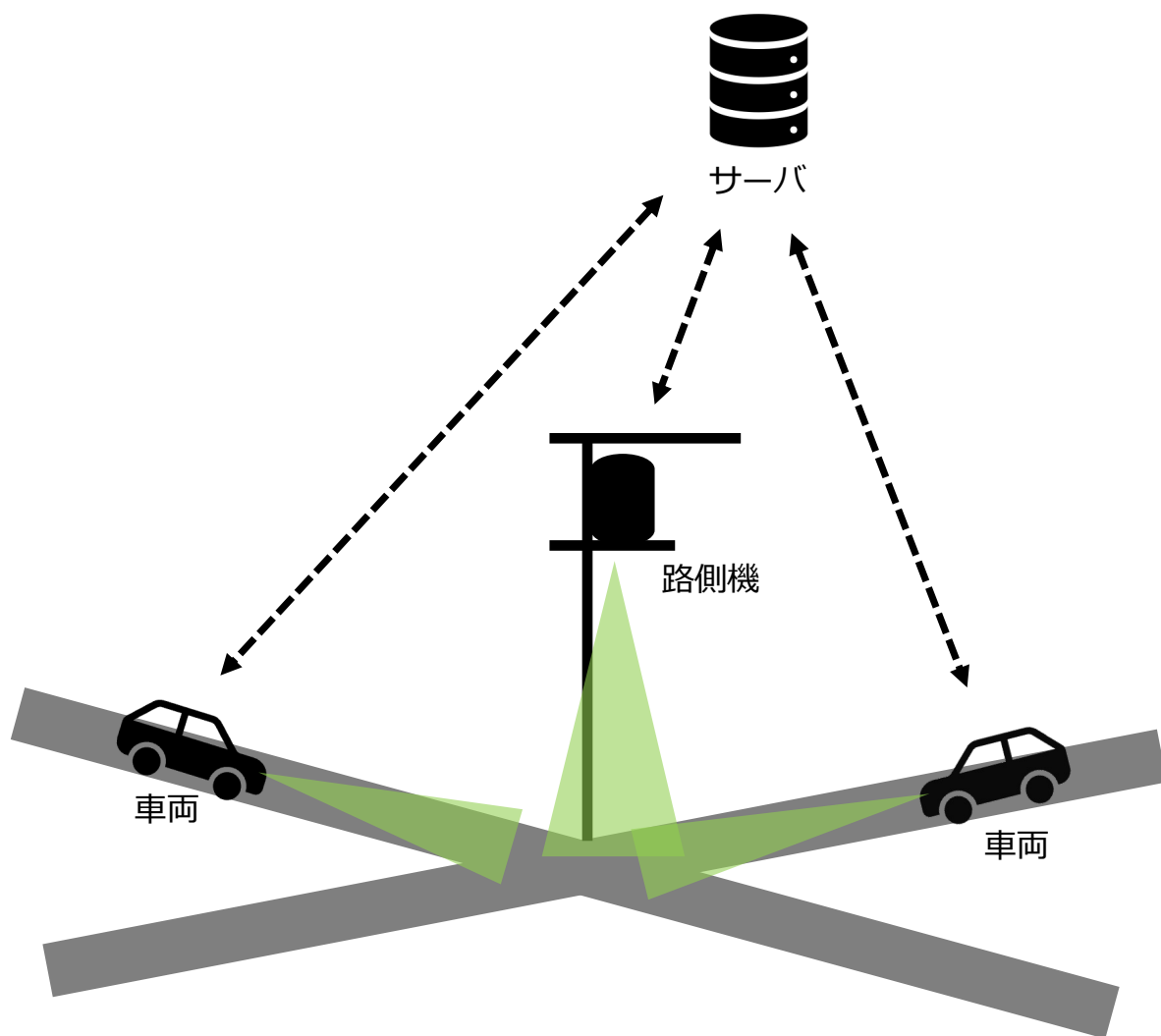


図 1: サーバを用いた協調型自動運転

### 1.3 本論文の構成

第2章では、協調型自動運転のV2X通信のQoS予測を行った関連研究について述べる。第3章では、ネットワーク仮想化技術を利用したV2X通信の制御と、QoSの予測および予約の方法について述べる。第4章では、提案手法の有効性を評価するための実験方法とその評価結果について述べる。第5章では、実験によって得られた結果に対して考察を行う。第6章では、本論文のまとめを述べる。

## 第2章 関連研究

協調型自動運転では、車両が周囲の車両や路側機、サーバなどリアルタイムで情報を共有することで、安全かつ効率的な交通システムを構築することができる。車両による事故を防ぐなどのユースケースに対して V2X 通信を行うため、協調型自動運転のための通信は厳しい QoS の要件が決められており、パケットロス率や通信遅延について詳細に要求されている。しかし、V2X 通信では車両の高い移動性や交差点における車両の集中など、様々な要因が通信の QoS に影響を与える QoS の急激な低下が発生した場合、協調型自動運転におけるアプリケーションの機能不全が発生し、状況によっては人間の安全を脅かす可能性がある。そのため、QoS の予測は重要であり、QoS の変化を予測することで事前に必要な対策を講じることができる。

Barmounakis らは、5G のネットワークからデータを収集・分析する機能を利用して QoS に関する指標を求め、地図情報をグリッドに分割して QoS の指標を用いてクラスタリングすることで、機械学習を用いて QoS を予測したネットワークシミュレータを用いた実験により、クラスタの数と予測精度のトレードオフの関係を示した。また、Xu らは、Transformer の長期時系列予測モデルである Informer モデルを利用し、V2X 通信の時間的および局所的な特徴を考慮した QoS 予測を行った。実際の交通渋滞を模倣した環境で V2X 通信に関するデータを収集し、パケットロス率および通信遅延について予測精度の向上を示した。

これらの研究を含めて、V2X 通信の QoS 予測に関する研究は機械学習を用いたものが多く見られるが、V2X 通信特有の拘束条件のもとに、複数の機械学習の比較や計算効率性の向上を目指している。機械学習を用いた予測では過去のデータから傾向をもとに予測を行うため、例えばある道路において通勤時間帯に車両が混雑するというデータがある場合、次の日もその時間帯に道路は混雑すると予測する。しかし、道路工事や交通事故などにより車両の走行ルートに変更が生じた場合、道路が混雑するエリアを正しく予測できない可能性がある。そのため、過去のデータだけではなく、現時点での車両の走行ルートなどの情報から、近い将来の QoS を予測することが重要である。また、車両は自身の情報およびサーバから受信する情報しか持たないため、他の車両の走行ルートなどからある地点での QoS が保証されるかを予測することができない。したがって、QoS 予測のもとに各車両の QoS が保証されるかを判別し、車両に通知する仕組みが必要となる。

## 第3章 提案手法

### 3.1 ネットワーク仮想化技術を利用したネットワーク

#### 3.1.1 協調型自動運転のためのネットワーク

協調型自動運転における車両とサーバの通信方式については様々な種類のものが議論・検討されているが、ここではセルラーネットワークを利用して基地局を介して通信する方式を考える。車両は協調型自動運転を行うに際して、近くにある基地局を介してサーバと通信を行う。サーバをどれほどの間隔で地理的に分散配置し、サーバ1台あたり何基の基地局と対応するかについても、基地局1基にサーバが1台とするなどの様々な議論があるが、本研究では複数の基地局に対して1台のサーバが対応し、対応する基地局の通信範囲内をそのサーバが管轄する領域として、管轄領域内の車両の協調型自動運転に関する通信や情報の処理を担当する、というネットワークを考える。

#### 3.1.2 ネットワーク仮想化技術による通信制御

通信のQoSを予測・予約するにあたり、車両と基地局、サーバの通信を制御するために、本研究ではネットワーク仮想化技術を利用する。ネットワーク仮想化技術とは、ソフトウェアを介してネットワークを一元管理する技術である。ネットワーク仮想化技術ではコントローラと呼ばれる機器がネットワークの状況の把握や経路の変更・更新を行うため、状況に合わせた柔軟なネットワークの変更が可能となる。本研究では、図 ??に示すように複数のサーバとその管轄領域内の車両との通信を1台のコントローラが管理することを考える。コントローラとサーバは有線で接続されており、通信遅延やパケットロスなどの影響は極めて小さいものとする。コントローラは、地図情報などの静的な情報に加えて、サーバからQoSの予測に必要な情報を定期的に受け取り、QoSを予測しその結果をエッジサーバへと送信する。具体的な情報の内容やQoSの予測の手順等については3.2節にて後述する。

車両とサーバ間の通信帯域は図のように大きく3つに分けられる。1つはQoSの予測のために車両が定期的に情報をサーバに送信し、QoSが保証されるかをサーバから車両へ通知されるために用いられる。この通信帯域は常に確保されているものとし、仮にサーバの管轄領域内に物理的に限界な台数まで車両が集中したとしても、この通信帯域は全体の通信帯域を超えることはないものとする。この通信帯域で行われる通信は、詳細な内容は後述するが時刻によって変化するものではないため、1台あたりの通信量が大きく変化することはないが、サーバの管轄領域内の車両台数の増減に合わせて通信量も変化すると考えられる。2つ目は協調型自動運転のための通信帯域である。車両は自身の走行情報や自車両に搭載されたセンサで認識した情報等をサーバに送信し、サーバは情報を処理して結果を車両に送信する。1つ目に説明した通信帯域と違い、この通信帯域で行われる通信の通信量は車両の周囲の走行環境などによって変化する。しかし、協調型自動運転のための通信はQoS予測のための通信と比較して通信量が大きく、サーバの管轄領域内に車両が集中することにより、通信帯域が逼

迫する恐れがある。3つ目はしたがって、本研究では2つ目の協調型自動運転のための通信のQoSを対象として、QoSの予測・予約を行う。

## 3.2 QoS 予測

### 3.2.1 コントローラが管理する情報

協調型自動運転のための通信のQoSを予測するにあたり、コントローラは一定時刻後のサーバの管轄領域内の車両の集中状況を予測する必要がある。そのため、コントローラは以下の情報を保持している。

- サーバの管轄領域の地図情報
- サーバと車両の通信において利用できる最大の通信帯域
- 後述するQoS予約によってすでに確保されている通信帯域

また、コントローラは、車両から基地局、エッジサーバを介して以下の情報を定期的に受け取る。

- 車両を一意に識別可能なID
- 車両IDと紐づけられた走行計画

以上の情報を用いて、SDNコントローラは一定時刻後の通信のQoSを予測する。

### 3.2.2 QoSの予測方法

協調型自動運転のための通信のQoSが保証されるかは、一定時刻後に使用される予定の通信量の合計を求め、利用できる最大の通信帯域と比較することで予測することができる。一定時刻後に使用される予定の通信量の合計を求めるために、一定時刻後の車両の集中状況を考える。SDNコントローラは車両から定期的に走行計画を受け取っているため、一定時刻後の車両の予測位置を把握することができる。ここで、一定時刻後のあるエッジサーバの管轄領域内の予測車両台数を $N$ 、1台あたりのQoS予測に必要な通信帯域を $B_{pred}$ とすると、QoS予測に必要な通信帯域は

$$N * B_{pred} \quad (1)$$

で求められる。また、QoSの保証および予約は連続的に行われるため、一定時刻後の通信帯域において、それよりも前の時刻にすでにQoSが保証されている、すなわち通信帯域の一部が確保されている場合がある。したがって、すでに確保されている通信帯域を $B_{saved}$ 、利用できる最大の通信帯域を $B_{max}$ とすると、一定時刻後に利用可能な通信帯域は

$$B_{max} - (N * B_{pred} + B_{saved}) \quad (2)$$

となる。 $N$ 台全ての車両が協調型自動運転のための通信を行った場合に、この通信帯域で逼迫することがないかを予測することで、QoSを予測することができる。協調型自動運転のための通信で使用する通信帯域は、車両の周囲の走行環境や運転操作によって異なるため、完全に予測することは難し



い。本研究では、時間帯や場所、周囲の車両台数等の条件を用いて過去の情報から統計的に導出された、使用すると予測された通信帯域を用いることを検討している。ある車両の協調型自動運転における使用予測通信帯域を  $B_{CAD}$  とすると、

$$\sum_{k=1}^n B_{CAD_k} > B_{max} - (N * B_{pred} + B_{saved}) \quad (3)$$

である時に、 $N$  台全ての車両の通信の QoS を保証することはできないと予測される。なお、使用予測通信帯域はあくまで統計的に予測されたものであり、多少の誤差があることが考えられるため、実際には、

$$\sum_{k=1}^n B_{CAD_k} > B_{max} - \{(N * B_{pred} + B_{saved}) + B_{extra}\} \quad (4)$$

のように誤差を吸収できる余分な通信帯域  $B_{extra}$  を考慮して計算するべきであると考えられる。

### 3.3 QoS 予約

#### 3.3.1 QoS の予約方法

通信帯域が逼迫し、通信の QoS が保証されないことを車両が事前に判断できない場合、車両は通常時と同様に通信を試みるが、必要な情報を協調型自動運転で許容される時間内に受け取ることができないため、自車両が持つ情報のみで運転操作を行わなければならない、安全や効率の点で重大な問題となる。そこで、本研究では、図 ?? に示すように、QoS 予測の結果をもとに、車両に一定時刻後の通信の QoS が保証されるか否かを通知し、同時にその時刻での通信帯域を事前に確保しておくことで、その時刻において協調型自動運転のための通信を行う車両を事前に決定し、車両が集中したとしても通信帯域の逼迫を防ぐことを考える。

まず、QoS 予測の結果、

$$\sum_{k=1}^n B_{CAD_k} \leq B_{max} - \{(N * B_{pred} + B_{saved}) + B_{extra}\} \quad (5)$$

となった場合、すなわち、全ての車両に対して一定時刻後の通信の QoS を保証することができるという予測した場合を考える。この場合、SDN コントローラは一定時刻後の全ての車両の通信の帯域を確保し、車両 ID をもとに該当する車両に対して一定時刻後の通信の QoS が保証されることを通知する。これにより、全ての車両は問題なく協調型自動運転のための通信を行うことができる。

次に、

$$\sum_{k=1}^n B_{CAD_k} > B_{max} - \{(N * B_{pred} + B_{saved}) + B_{extra}\} \quad (6)$$

となった場合、すなわち、全ての車両が通信を行った場合に通信帯域が逼迫し、通信の QoS が保証できないと予測した場合を考える。この場合、全ての車両が通信を行った際に、通信帯域の逼迫により全ての車両が協調型自動運転の許容時間内に情報が受け取れない可能性があるため、通信帯域が逼迫しないように一部の車両を選択して QoS を保証し、残りの車両には通信を行わないよう通知することで通信帯域の逼迫を防ぐ。QoS を保証する車両の選択は、一定時刻後における車両の運転操作の優先度を考慮して決定する。例えば、一定時刻後において、他車両と調停しながら右左折を行なっ

ている最中である車両と、特に前後の時刻と変わらず直進を続けている車両がいた場合、右左折を行なっている車両の通信の QoS を優先的に保証する。優先度による車両の選択の後、同じ優先度から車両を選択しなければいけない場合は、現段階ではランダムな選択を考えている。しかし、本研究では検討の対象外としたが、QoS が保証されない車両も安全かつ効率的な運転のために、迂回経路の使用やその他の通信の併用などの方法で対策が必要であり、同じ優先度から選択する場合はそういった対策との兼ね合いを考慮して選択するのが望ましいと考えられる。

### 3.3.2 QoS の予約時間

図 ?? に示すように、一定時刻後に交差点を右折する車両の通信の QoS を保証する場合を考える。この時、一定時刻ごとに新たに QoS を保証する車両を選択しているとすると、右折開始時には QoS が保証されていたにもかかわらず、右折途中の新たな QoS 予約で QoS が保証されなくなる、といった事態が発生する可能性がある。右折などの周囲の車両と調停を必要とする運転操作や、自車両のセンサのみでは認識できない走行環境の認識を必要とする運転操作を行なっている最中に協調型自動運転のための通信を行えないと通知された場合、突然情報が遮断されることになるため、安全性に重大な問題が生じる。そのため、QoS を予約する際に、SDN コントローラは車両から受け取った走行計画から一定時刻後の運転操作を把握し、必要に応じてあらかじめそこから一定時間の通信帯域もまとめて予約しておく。これにより、協調型自動運転のための通信の優先度が高い運転操作は、開始前に通信の QoS が保証されると通知されれば、その運転操作が完了するまで通信の QoS は保証されることになる。QoS をどれくらいの時間予約するかについては、?? 項の使用予測帯域と同様に、時間帯や場所、周囲の車両台数等の条件を用いて過去の情報から統計的に求められた値を用いることを考えている。QoS 予約された通信帯域は、?? 項の  $B_{saved}$  として SDN コントローラが保持し、以降の QoS 予測の際に利用可能な通信帯域から除いて計算する。

## 第4章 評価

### 4.1 評価環境

提案手法の有効性を評価するにあたり，ネットワークエミュレータである Mininet を用いてホームネットワークと ISP サーバ間のネットワークを想定した仮想ネットワークを構築し，ネットワークシミュレーションを行った．構築したネットワークの構成を図 ??に示す．

4つのデバイスおよび ISP サーバは Mininet のホスト，ゲートウェイは Mininet の Open VSwitch として実装した．4つのデバイスはゲートウェイと接続しており，それぞれカテゴリ 1~4 の通信を行う．ゲートウェイはルータを経由せず，直接 ISP サーバと接続している．通常，ホームネットワークと ISP サーバ間の通信帯域はホームネットワーク内の通信帯域と比較して小さい．そのため，ホームネットワーク内のデバイスやホームネットワークそのものの数が少ない場合には提案手法に対してルータの有無は影響しないことから，上記のネットワーク構成によりシミュレーションを行なった．ゲートウェイは SDN コントローラと接続し，優先度制御に必要なメッセージをやり取りする．SDN コントローラには，SDN 構築フレームワークである Ryu を用いた．

提案手法の有効性を評価するため，通信帯域が逼迫した際に優先度が高い通信の性能を測定する．通信帯域の逼迫を再現するため，各デバイスとゲートウェイ間のリンクおよびゲートウェイと ISP サーバ間のリンクの通信帯域を 1Mbps に制限する．そして，TCP/IP パケットジェネレータおよびアナライザである hping3 を用いて，各デバイスから ISP サーバへとパケットを送信する．送信するパケットのパラメータを表 1 に示す．

SDN コントローラは，各デバイスが接続されているゲートウェイの 4つのポートが受信する通信量を監視し，15秒おきにアドミッション制御を行うか否かを決定する．各ポートごとに通信量の閾値を設定し，アドミッション制御の決定間隔の 15秒間で各ポートが受信した総通信量が閾値を超えた場合，そのポートに接続されているデバイスの通信を行うのに十分な通信帯域がないと見なし，そのポートが行っている通信の優先度に応じてアドミッション制御が行われる．各ポートの閾値を表 2 に示す．SDN コントローラは??節に示した式??を用いて破棄するフローを選択し，ゲートウェイにフローの破棄を指示する．指示を受けたゲートウェイは，そのフローを受信しても ISP サーバへ送信せず破棄する．次に 15秒経過して，アドミッション制御を行うか否かを判断する前に，破棄されていたフローを再度ゲートウェイに登録する．そしてアドミッション制御を行い，破棄するフローに再度選ばれた場合は，連続してフローが破棄される．別のフローが選択された場合は，先ほどまで破棄

表 1: 各デバイスが送信するパケットのパラメータ

送信間隔	1000ms
データサイズ	34464Byte
パケット数	500

表 2: 各ポートの通信量の閾値

カテゴリ 1	100KByte
カテゴリ 2	1000KByte
カテゴリ 3	1000KByte
カテゴリ 4	100KByte

されていたフローの通信は再開され、新たに選択されたフローの通信が切断される。破棄するフローの選択には、??節で述べた通り破棄された回数も優先度と同時に用いる。ここでは、各カテゴリの重みの初期値を  $w_2 = 3$ ,  $w_3 = 2$ ,  $w_4 = 1$  とした。

通信帯域が逼迫した際に優先度の高い通信の品質を改善できているかを評価するため、各優先度の通信のデバイスから ISP サーバまでのスループット、デバイスがパケットを送信してからその応答がデバイスに返ってくるまでの遅延時間、パケット損失率を測定し、提案手法を用いない場合と比較する。また、優先度の動的な設定の有効性を評価するため、カテゴリ 3 とカテゴリ 4 の優先度が入れ替わった場合において、提案手法と固定された優先度分類を用いた優先度制御のスループット、遅延時間、パケット損失率を測定し比較する。さらに、リアルタイム性を考慮して分類したカテゴリ 2 とカテゴリ 3 について、損失または破棄されたパケットのシーケンス番号を比較し、パケットの連続性からリアルタイム性について評価する。

## 4.2 通信性能

提案手法を用いた場合と優先度制御を行わなかった場合とのスループットの比較を図 ??に示す。ここで、最も優先度が高い順に各通信を優先度 1~4 とし、それぞれカテゴリ 1~4 に対応する。提案手法を用いた場合の優先度 1 のスループットは 228.84Kbps, 優先度 2 のスループットは 200.35Kbps, 優先度 3 のスループットは 143.37Kbps, 優先度 4 のスループットは 98.33Kbps であった。優先度制御を行わない場合の優先度 1 のスループットは 163.59Kbps, 優先度 2 のスループットは 212.3Kbps, 優先度 3 のスループットは 216.89Kbps, 優先度 4 のスループットは 218.73Kbps であった。

提案手法を用いた場合と優先度制御を行わなかった場合との遅延時間の比較を図 ??に示す。棒グラフは平均遅延時間、エラーバーの上限、下限はそれぞれ最大遅延時間、最低遅延時間を表す。提案手法を用いた場合の優先度 1 の平均遅延時間は 8634.0ms, 優先度 2 の平均遅延時間は 8601.9ms, 優先度 3 の平均遅延時間は 8342.6ms, 優先度 4 の平均遅延時間は 8536.4ms であった。優先度制御を行わない場合の優先度 1 の平均遅延時間は 9026.7ms, 優先度 2 の平均遅延時間は 9392.9ms, 優先度 3 の平均遅延時間は 9256.6ms, 優先度 4 の平均遅延時間は 9486.7ms であった。

提案手法を用いた場合と優先度制御を行わなかった場合とのパケット損失率の比較を図 ??に示す。提案手法を用いた場合の優先度 1 のパケット損失率は 17%, 優先度 2 の平均遅延時間は 28%, 優先度 3 の平均遅延時間は 48%, 優先度 4 のパケット損失率は 65% であった。提案手法を用いた場合の優先度 1 のパケット損失率は 41%, 優先度 2 の平均遅延時間は 23%, 優先度 3 の平均遅延時間は 22%, 優先度 4 のパケット損失率は 21% であった。

## 4.3 動的な優先度分類

カテゴリ 3 とカテゴリ 4 の優先度が入れ替わった場合、すなわちカテゴリ 1=優先度 1, カテゴリ 2=優先度 2, カテゴリ 4=優先度 3, カテゴリ 3=優先度 4 の場合について、提案手法を用いて動的に優先度分類を行なった通信性能と固定された優先度分類を用いた通信性能を比較する。提案手法を用いた場合と固定された優先度分類を用いた場合とのスループットの比較を図 ??に示す。提案手法を用いた場合の優先度 1 のスループットは 246.98Kbps, 優先度 2 のスループットは 204.03Kbps, 優先度 3 のスループットは 182.89Kbps, 優先度 4 のスループットは 99.26Kbps であった。優先度制御を行わ

ない場合の優先度 1 のスループットは 240.79Kbps, 優先度 2 のスループットは 194.84Kbps, 優先度 3 のスループットは 103.85Kbps, 優先度 4 のスループットは 172.78Kbps であった。

提案手法を用いた場合と優先度制御を行わなかった場合との遅延時間の比較を図 ??に示す。棒グラフは平均遅延時間, エラーバーの上限, 下限はそれぞれ最大遅延時間, 最低遅延時間を表す。提案手法を用いた場合の優先度 1 の平均遅延時間は 6704.9ms, 優先度 2 の平均遅延時間は 6532.8ms, 優先度 3 の平均遅延時間は 6816.8ms, 優先度 4 の平均遅延時間は 6561.3ms であった。優先度制御を行わない場合の優先度 1 の平均遅延時間は 6802.5ms, 優先度 2 の平均遅延時間は 6834.7ms, 優先度 3 の平均遅延時間は 6276.8ms, 優先度 4 の平均遅延時間は 6745.1ms であった。

提案手法を用いた場合と優先度制御を行わなかった場合とのパケット損失率の比較を図 ??に示す。提案手法を用いた場合の優先度 1 のパケット損失率は 10%, 優先度 2 の平均遅延時間は 26%, 優先度 3 の平均遅延時間は 34%, 優先度 4 のパケット損失率は 64% であった。提案手法を用いた場合の優先度 1 のパケット損失率は 13%, 優先度 2 の平均遅延時間は 30%, 優先度 3 の平均遅延時間は 63%, 優先度 4 のパケット損失率は 38% であった。

## 4.4 通信のリアルタイム性

??節で, リアルタイム性の観点から音声・映像データの通信をカテゴリ 2 とカテゴリ 3 に分類した。カテゴリ 2 とカテゴリ 3 のそれぞれの損失または破棄されたパケットのシーケンス番号を比較することで, パケットの連続性からリアルタイム性を評価する。それぞれのパケットが到達/損失または破棄されたシーケンス番号を図 ??に示す。パケット到達の値が 1 の時はパケットが正常に到達しており, 0 の時はパケットが損失または破棄されていることを表す。カテゴリ 2 では 6 回のパケットの損失または破棄があったのに対して, カテゴリ 3 では 7 回のパケットの損失または破棄があった。

## 第5章 考察

本章では、4章で述べた結果をもとに提案手法の有効性を考察する。提案手法を用いることで、優先度制御を行わない場合や固定された優先度分類を用いた場合と比較して、スループット、遅延時間、パケット損失率に与える影響を考察する。

まず、4.2節の結果をもとに、優先度制御を行わない場合と比較して、提案手法の有効性を考察する。図 ??に示すように、最も優先度の高い優先度1の通信のスループットは、提案手法を用いた場合の方が優先度制御しない場合と比較して向上している。しかし、優先度2~4の通信ではスループットが低下しており、通信全体のスループットは低下している。また、図 ??に示すように、優先度1の通信のパケット損失率は改善しているが、優先度2~4の通信のパケット損失率は増加した。これは、提案手法では各ポートに設定した通信量の閾値を超えた際にアドミSSION制御を行うため、まだ通信帯域が逼迫しきっておらず、パケットを送信する余裕があったがパケットを破棄してしまったことが原因である。一方、優先度制御を用いない場合は、通信帯域の限界のみでしかパケットの損失が発生しないため、提案手法を用いた場合と比較して通信全体のスループットとパケット損失率は高い品質を示した。アドミSSION制御を、通信量の閾値をもとに行うのではなく、通信帯域の逼迫率をもとに行うことで、スループットとパケット損失率の改善が可能である。

図 ??に示すように、デバイスがパケットを送信してからその応答がデバイスに返ってくるまでの遅延時間は、提案手法を用いた場合が優先度制御しない場合と比較して軽減した。これは、優先度制御を用いない場合では、通信帯域が逼迫した際にTCPの確認応答と再送制御が行われるため遅延時間が増加するのに対して、提案手法では通信量が閾値を超えた場合にパケットが破棄されるため、確認応答と再送制御がそもそも行われず、その分遅延時間が軽減されることが原因である。通信帯域の逼迫率を監視し、パケットの到達が見込めない時はパケットを破棄することで、遅延時間を軽減することが可能である。

次に、4.3節の結果をもとに、提案手法の動的な優先度分類の有効性を考察する。図 ??に示すように、提案手法を用いた場合では優先度の変更に合わせてアドミSSION制御を行なったため、カテゴリ4=優先度3のスループットがカテゴリ3=優先度4のスループットよりも高くなっている。一方、固定された優先度分類では、カテゴリ4=優先度3のスループットがカテゴリ3=優先度4のスループットよりも低くなっており、優先度の変化に対応できていない。また、パケット損失率についても、提案手法ではカテゴリ4=優先度3のパケット損失率がカテゴリ3=優先度4のパケット損失率よりも低下しているのに対して、固定した優先度分類ではカテゴリ4=優先度3のパケット損失率がカテゴリ3=優先度4のパケット損失率より高くなっている。動的な優先度分類によって、優先度の変更に対応した優先度制御を実現した。

しかし、遅延時間については、図 ??からわかるように、提案手法を用いた場合、固定された優先度分類を用いた場合ともに、カテゴリ4=優先度3とカテゴリ3=優先度4で動的な優先度分類が有効に作用した結果は見られない。提案手法を用いた場合の遅延時間は固定された優先度分類を用いた場合の遅延時間と比較して最大遅延時間や平均遅延時間が軽減されているが、どちらも図 ??の提案手法を用いた場合の遅延時間より小さいことから、誤差の範囲内である。上記のようにパケットの破棄

が遅延時間の軽減に繋がるため、実際のホームネットワークで長時間の動的な優先度制御では遅延時間の軽減が可能である。

最後に、4.4 節の結果をもとに、通信のリアルタイム性について考察する。図 ?? に示すように、リアルタイム性の高い音声・映像データの通信であるカテゴリ 2 ではリアルタイム性の低い音声・映像データの通信であるカテゴリ 3 と比較して、パケットが損失または破棄された回数が 1 回少なく、パケット到達が 1 の値を連続してとる時間も長いことから、提案手法ではカテゴリ 2 のリアルタイム性を向上していることがわかる。?? の式 ?? に示した  $w_2$  の値を調整することで、通信帯域やホームネットワークの状況に応じたリアルタイム性の向上が可能である。

## 第6章 おわりに

ホームネットワークの拡張や複雑化に伴い、SDNのホームネットワークへの適用が期待されている。ホームネットワークには重要度やQoS要件といったデータ特性が異なる通信が混在する。また、ホームネットワークはユーザや時間帯による通信の種類と量の変動が大きく、ユーザや家庭の状況によって通信の重要度や需要も変化する。そのため、SDNをホームネットワークに適用するには、データ特性を考慮した動的な優先度分類が求められる。しかし、これまで提案された優先度分類では、リアルタイム性が考慮されておらず、通信帯域の逼迫や優先度制御に伴うパケット損失の通信への影響が大きかった。また、固定された優先度分類を用いていたため、優先度に変更が求められる状況に対応した優先度制御ができなかった。よって、リアルタイム性を含むデータ特性を考慮し、動的に優先度分類を行う優先度制御が必要となる。

本論文では、リアルタイム性を含むデータ特性からホームネットワークの通信を4つのカテゴリに分類した。また、通信帯域が逼迫した際に、優先度の高い通信の通信帯域を確保するため、優先度の低い通信を破棄するアドミッション制御を提案した。破棄する通信を選択する際、優先度のみを考慮して選択するといつまでも同じ通信が破棄対象として選択され続ける恐れがある。そのため、各通信ごとにこれまで破棄された回数を記録し、通信の優先度に対応した重みと合わせて新たに破棄する通信を選択する基準として用いる。さらに、カテゴリに割り当てられた優先度の変更が必要な際には、通信の優先度に対応した重みとこれまで破棄された回数をカテゴリ間で入れ替えることで、動的に優先度を変更することができる。

ホームネットワークを想定した仮想ネットワークを構築し、ネットワークシミュレーションを行うことで提案手法の有効性を検証した。優先度制御を行わない場合と比較して、優先度の高い通信のスループットとパケット損失率を改善した。また、固定された優先度分類と比較して、優先度に変更があった場合でも、動的に優先度分類を行い優先度に応じた優先度制御を実現した。さらに、リアルタイム性を考慮して分類した通信について、パケットの損失または破棄された回数や連続して到達した時間からリアルタイム性の向上を示した。



## 謝辞

本研究を進めるにあたって，多大なご指導とご支援を賜りました同志社大学理工学部の佐藤健哉教授に心より感謝いたします．また，研究内容について親身にアドバイスをくださった山本浩太郎先輩をはじめとしたネットワーク情報システム研究室のみなさまには，大変お世話になりました．さらに，学校生活や研究活動を支えて支えてくれた友人と家族へ感謝いたします．

## 参考文献

- [1] 横山俊夫, 波多野邦道, 小沢浩一郎, 樋山智, 小高賢二, 自動車業界における自動運転実用化に向けた取り組み, 学術の動向, Vol.25, No.5, pp.17-21 (2020).
- [2] 辰巳周一, 樋口竜貴, 染谷竜太, 協調型自動運転の実現に向けた最新の技術動向と課題, 電気学会誌, Vol.140, No.5, pp.308-311 (2020).
- [3] 菅沼英明, ITS・自動運転の動向と今後, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, Vol.15, No.2, pp.102-108 (2021).
- [4] Fuhui Zhou, Rose Qingyang Hu, Zan Li, and Yuhao Wang, Mobile edge computing in unmanned aerial vehicle networks, *IEEE Wireless Communications*, Vol.27, No.1, pp.140-146 (2020).
- [5] Ignacio Soto, Maria Calderon, Oscar Amador and Manuel Uruena, A survey on road safety and traffic efficiency vehicular applications based on C-V2X technologies, *Vehicular Communications*, Vol.33, No.100428 (2022).
- [6] Zoraze Ali, Sandra Lagen, Lorenza Giupponi and Richard Rouil, 3GPP NR V2X Mode 2: Overview, Models and System-Level Evaluation, *IEEE Access*, Vol.9, pp.89554-89579 (2021).

## 研究業績

- [1] 国本 典晟, 細野 航平, 滕 睿, 佐藤 健哉, "ホームネットワークにおけるデータ特性を考慮した SDN による優先度制御手法, " 情報処理学会 第 84 回全国大会. 2022. (発表予定)